



Conception d'une boucle à sels fondus - Etude préliminaire

D. Perrier, J. Etay, P. Petitpas, Ch. Garnier, M. Allibert, V. Ghetta, M. Heusch, D. Heuer, J.C. Poignet, J.P. Caire

► To cite this version:

D. Perrier, J. Etay, P. Petitpas, Ch. Garnier, M. Allibert, et al.. Conception d'une boucle à sels fondus - Etude préliminaire. 2005, pp.1-25. in2p3-00025342

HAL Id: in2p3-00025342

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00025342>

Submitted on 10 Jan 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Rapport LPSC n° 05-146

Conception d'une boucle à sels fondus Etude préliminaire

(étude réalisée dans le cadre du PCR "réacteur à sels fondus")

D. Perrier , J. Etay , P. Petitpas , Ch. Garnier ¹

M. Allibert ²

V. Ghetta , M. Heusch , D. Heuer ³

J.C. Poignet , J.P. Caire ⁴

¹ EPM Madylam (UPR 9033) ENSHMG BP95 38402 St Martin d'Hères Cedex

² 23 Av. Marcellin Berthelot 38100 Grenoble

³ LPSC (UMR 5821) 53 Av des martyrs 38026 Grenoble Cedex 1

⁴ LEPMI (UMR5631) ENSEEG BP 75 38402 St Martin d'Hères Cedex



Décembre 2005

Sommaire

1. Présentation de l'étude	3
2. Premier schéma proposé de la boucle à sels	4
2.1 Fonctions assurées par la boucle	4
2.2 Phases de développement	4
2.3 Schéma de la boucle	5
3. Caractéristiques du circuit	6
3.1 Dimensions	6
3.2 Matériau de la tuyauterie	7
3.3 Chauffage/Calorifugeage des tuyaux	7
3.4 Vannes	7
4. Système de fusion/alimentation des sels fluorés	8
4.1 Composition des sels	8
4.2 Fusion des sels	8
4.2.1 Cuve conteneur	8
4.2.2 Puissance requise	8
4.2.3 Fours à résistance	9
4.3 Protocole expérimental de fusion/alimentation en sels	9
5. Description de la pompe	10
5.1 Caractéristiques requises	10
5.2 Pompes commerciales	11
6. Définition des systèmes d'étude et des moyens de mesure	12
6.1 Systèmes d'étude	12
6.2 Moyens de mesure	12
6.3 Boîte à gant	13
7. Références	13
Annexe 1 : Dernière boucle réalisée à l'ORNL (1976) pour l'étude de corrosion	14
Annexe 2 : Caractéristiques physiques des alliages	15
Annexe 3 : Caractéristiques physiques des sels fluorés	17
Annexe 4 : Stabilité thermodynamique des constituants des sels fluorés et du matériau de tuyauterie	18
Annexe 5 : Pompes chimiques en métaux "exotiques" - SGL Carbon	19
Annexe 6 : Dimensionnement d'une pompe électromagnétique pour le circuit de sel	20
Annexe 7 : Principales caractéristiques de la boucle	24

1. Présentation de l'étude

Dans un contexte énergétique de plus en plus tendu, la recherche de procédés de meilleurs rendements énergétiques est une priorité [1]. L'utilisation de chaleur à haute, voire très haute température, est au centre de nombreuses applications prometteuses (réactions à haut rendement, production d'hydrogène, filières nucléaires pour la fission et la fusion,...).

L'utilisation de sels fondus, excellents caloporteurs, stables, peu volatiles, et insensibles aux radiations, est particulièrement adaptée à ces applications [2-4]. Il est donc indispensable que, dans les meilleurs délais, nous soyons capables de maîtriser leur application et d'en connaître les limites. C'est pourquoi, nous proposons d'étudier la faisabilité de la construction d'une boucle hydraulique fonctionnant avec du sel fondu qui servira de banc d'essais, à échelle pilote, pour des dispositifs, produits et matériaux, destinés au fonctionnement dans des circuits caloporteurs pour la production électrique ou chimique, associée ou non à des réacteurs nucléaires. De telles boucles hydrauliques ont déjà été étudiées par l'Oak Ridge National Laboratory (ORNL) de 1958 à 1976 [5] (c.f. Annexe 1).

Les sels utilisés dans la boucle seront des fluorures. Les températures visées iront de 600 à 1000°C. Les conditions opératoires chimiques seront celles requises pour un réacteur nucléaire à sels fondus. La taille de l'installation et les vitesses de circulation du sel fondu seront proches de ce qui est envisagé pour un équipement industriel. Il en sera de même des conditions chimiques imposées aux sels testés (teneur en oxygène, potentiel redox).

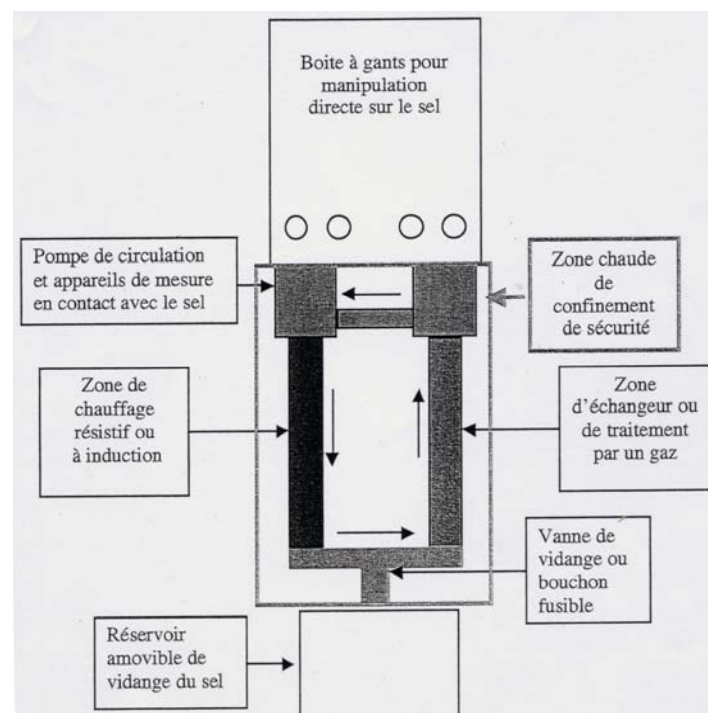


Figure 1 : Schéma de principe de la boucle à sels fondus

Cette boucle sera adaptée au branchement de dispositifs à tester, mis au point par ailleurs. Il s'agira :

- de divers dispositifs de construction (chauffage, canalisations isolées thermiquement, échangeurs thermiques, pompes, filtres, séparateurs de gaz et de particules)

- de matériel de mesure sur le sel circulant (vitesses du sel, composition chimique, potentiel redox, turbidité, température)
- de moyens d'action (température, mélange, séparation) notamment électromagnétique.

Une illustration de principe de la boucle à sels fondus est présentée sur la figure 1.

2. Premier schéma proposé de la boucle à sels

2.1 Fonctions assurées par la boucle

Les fonctions visées sont de différents ordres : validation de concepts techniques, mesures et études de comportement, site expérimental commun vecteur de collaboration interdisciplinaire. Il s'agit, par exemple, de montrer que des solutions réalistes peuvent être envisagées pour concevoir un réacteur nucléaire expérimental, grâce à des essais à échelle pilote, proche de l'unité, mais avec des durées de fonctionnement plus courtes. En disposant d'une installation où les sels fondus sont protégés de l'atmosphère et les opérateurs protégés des sels, on peut envisager des mesures de propriétés ou des essais de matériel de mesure.

Les études prévues sur la boucle à sels dans les années à venir sont listées ci-dessous.

Circulation de sel pur (sans particules en suspension et sans gaz dissous) :

Essais de pompes et d'échangeurs, mesures des pertes de charge, efficacité des transferts thermiques, homogénéisation chimique après injection, contrôle Redox. La réalisation de ces objectifs suppose une maîtrise technologique de base, par exemple à 700°C, avec des aciers, suivie de modifications pour atteindre des températures avoisinant 1000°C (matériaux carbonés, mode de chauffage, isolants thermiques en contact avec le sel).

Circulation de sel chargé (gaz dissous, bulles, particules en suspension) :

Un point clé du fonctionnement d'un réacteur à sels fondus est la capacité à extraire des produits de fission comme le Xe ou le Mo. Il est important de connaître le comportement de ces éléments dans les diverses parties du circuit de sel pour éviter toute accumulation locale. Il est aussi important de trouver des dispositifs permettant d'éliminer les éléments chimiques indésirables (filtres, entraînement gazeux, séparation magnétique ou électromagnétique) compatibles avec la circulation rapide (1 m/s à 3m/s) du sel. Pour cela il faut disposer de moyens de détection à chaud de ces accumulations (ultrasons).

Traitement par un gaz :

Ce type de traitement, pour enlever les gaz rares neutrophages, a déjà été testé dans les années 60. Il a été observé qu'il permettait d'extraire une partie des produits de fission métalliques, sans que cela ait été prévu à l'avance. Il est donc intéressant d'examiner le fonctionnement de diverses mises en œuvre de ce dispositif, complété par un traitement spécifique des aérosols pour tenir compte de leur nature et de la production de chaleur associée à leur évolution nucléaire. Après mise au point d'un dispositif à petite échelle des essais à échelle proche de l'unité seront faits sur la boucle.

Echanges thermiques :

Des éléments d'échangeurs thermiques en graphite, SiC ou composites carbone-carbone pourront être testés et leurs performances (thermique, étanchéité au sel et aux gaz) ainsi que leur tenue aux contraintes thermiques, de leur corrosion, de leur abrasion, de l'arrêt de particules métalliques ou de bulles de gaz seront établies.

2.2 Phases de développement

La plate-forme comportera des équipements permanents et des équipements modifiables ou à durée de vie limitée. Ces derniers seront des équipements à tester et à améliorer.

Dans une première phase les équipements permanents seront construits et une Première Version de Boucle de sels (PVB), sera mise en place. Les fonctions de cette première boucle seront la mise au point du fonctionnement de la plate-forme et la vérification des comportements les plus élémentaires du dispositif, comme :

- la sécurité des installations
- le remplissage du circuit en sel liquide,
- son étanchéité au sel et à l'atmosphère externe,
- la vidange programmée ou de sécurité du sel,
- la pollution du sel (oxygène, vapeur d'eau),
- les cinétiques de montée en température, et le contrôle de cette température en tout point du circuit,
- la circulation du sel (avec un premier type de pompe)

Aucune expérimentation ne pourra être faite avant qu'un état de fonctionnement satisfaisant de cette première boucle n'ait été obtenu.

Dans une deuxième phase, un certain nombre de moyens de mesure seront mis en œuvre. Il s'agit essentiellement de caractériser: la vitesse du sel (Doppler ultrasons), le débit (débitmètre éventuellement électromagnétique), la température (thermocouple), le potentiel redox (sonde électrochimique), des prélèvements de sel et ajouts divers. Ces mesures visent à caractériser en continu le sel en circulation, à suivre les évolutions des paramètres au cours du temps et éventuellement à envisager des dispositifs de régulation. A ce stade des fonctionnements de longue durée ($t > 24$ heures) permettront une première évaluation des défauts du système choisi (usure, corrosion, fuites, pollutions).

Enfin, dans une troisième phase, des dispositifs spécifiques, étudiés en parallèle des deux premières phases, seront montés sur la boucle pour des essais qualitatifs. Il s'agit :

- de sondes électrochimiques pour le sel et les gaz (oxygène, hydrogène, référence pour les fluorures),
- de dispositif de traitement de sel par les gaz, avec mélange et séparation sur sel circulant,
- de moyens d'homogénéisation du sel et de dispersion de solides (pulses électromagnétiques),
- d'un échangeur thermique pour assurer le cyclage thermique du sel dans la boucle (transports et corrosion dus aux gradients thermiques).

2.3 Premier schéma de la boucle

Un premier schéma d'une boucle à sels fondus permettant de remplir les fonctions énoncées dans le chapitre 2.1 est présenté sur la figure 2. Les principaux éléments constitutifs de la boucle, qui seront détaillés dans les prochains chapitres et dont les principales caractéristiques sont résumées en Annexe 7, sont :

- le circuit composé de l'ensemble de la tuyauterie, des vannes et d'une cuve à niveau constant (cf. chapitre 3),
- le système de fusion des sels fluorés et d'alimentation de la boucle en sels (cf. chapitre 4)
- la pompe (cf. chapitre 5),
- les différents systèmes d'étude et les moyens de mesure (cf. chapitre 6)

Tous les éléments de la boucle à l'exception du système d'alimentation en gaz et de la boîte à gants sont confinés à l'intérieur d'une enceinte de sécurité.

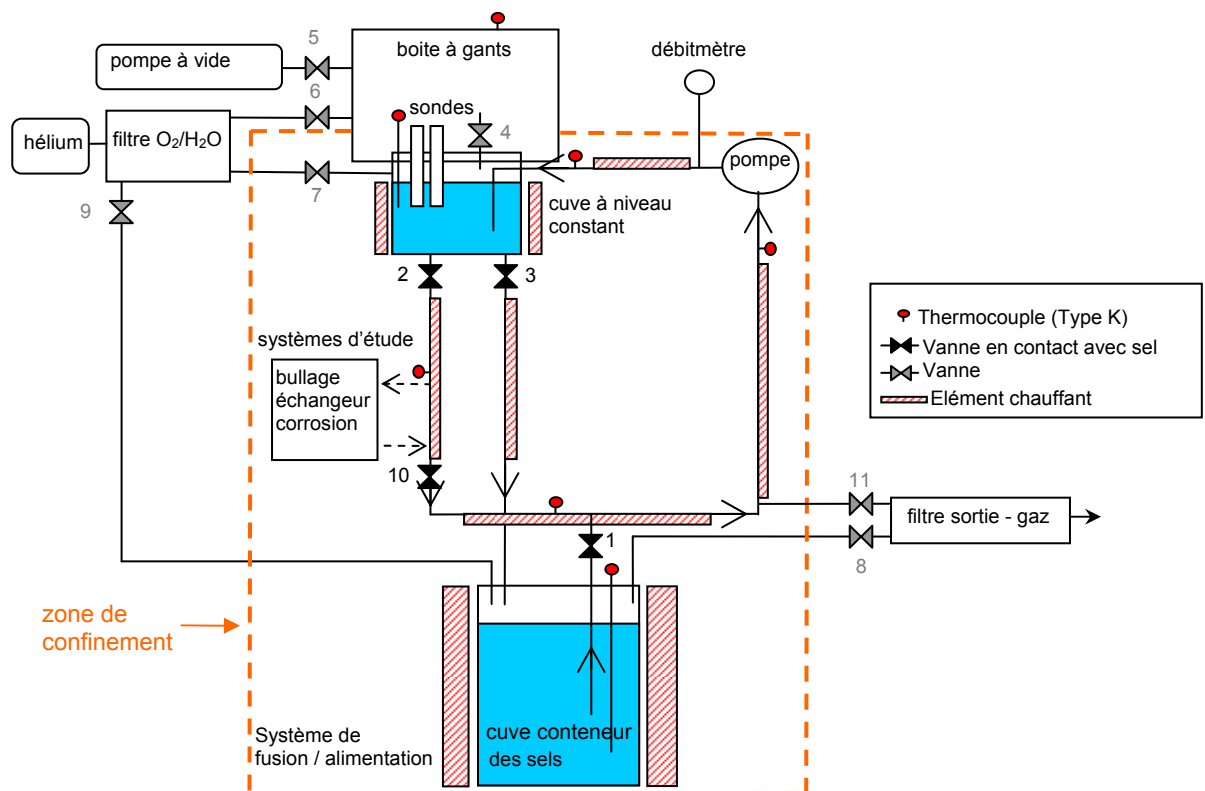


Figure 2 : Premier schéma de la boucle à sels fondus

3. Caractéristiques du circuit

3.1 Dimensions

En première approximation, la boucle peut être assimilée à un circuit rectangulaire de hauteur 2 m et de longueur 4.5 m, soit une longueur totale de tuyauterie (ne tenant pas compte de l'échangeur) de l'ordre de 13 m. (c.f. figure 3). Le diamètre intérieur des tuyaux est fixé à 5 cm. Les dimensions de la cuve à niveau constant sont $\varnothing = 30$ cm, $H = 30$ cm avec une hauteur de sel de 20 cm soit un volume de sel de l'ordre de 21 l.

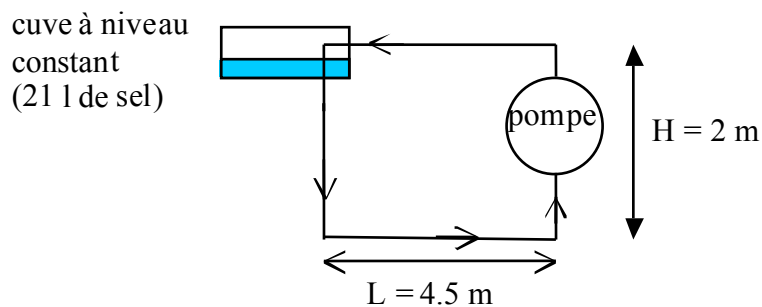


Figure 3 : Schéma très simplifié de la boucle à sels.

3.2 Matériau de la tuyauterie

Le matériau le mieux adapté à la corrosion par les sels et à la radioactivité en milieu nucléaire est l' Hastelloy N (Ni71/Mo16/Cr7/Fe5) [4,5]. Un autre candidat possible à base nickel étudié par l'ORNL est l'Inconel (Ni62/Cr21/Mo9/Fe5) [6]. L'Hastelloy étant un matériau assez cher, il faudrait plutôt privilégier l'Inconel comme matériau de base du circuit.

Des caractéristiques physiques de ces alliages sont présentées en Annexe 2 et sont également disponibles sur internet [7]. Il est à noter que les techniques conventionnelles d'usinage et de soudure (similaires à celles employées pour l'acier inoxydable) sont utilisables avec ces alliages.

3.3 Chauffage/Calorifugeage des tuyaux

La température de fusion des sels avoisine les 460°C. Pour le dimensionnement, on se place à une température nominale de 700 °C. Pour le maintien en température, des sections de tuyaux sont entourées de demi-coquilles de chauffage dont les caractéristiques pourraient être:

Type	Ø int (cm)	L (cm)	Puissance (W)
Demi-coquilles FIBROTHAL (kanthal) [10]	7	25	450
	7	50	900
	10	25	650
	10	50	1300
Semi-Monocoques de chauffage KERFA	10	25	720
	10	50	1450

Pour le calorifugeage des tuyaux, il existe un isolant à base de silice fabriqué par la société Microtherm sous forme rigide ou souple qui affiche des conductivités très intéressantes de 0.035 W.K⁻¹.m⁻¹ par rapport à une céramique classique de conductivité 0.2 W.K⁻¹.m⁻¹ [8]. La société Final commercialise également des isolants thermiques intéressants qui évitent l'utilisation des céramiques usinables [9].

Le phénomène de dilatation des tuyaux devra être pris en compte puisque avec un coefficient d'expansion thermique de 14.10⁻⁶ m/m.K, les tuyaux en Inconel seront soumis à une dilatation de quelques cm. Pour compenser ces contraintes on peut utiliser des systèmes de lyres placés au bout des longues sections de tuyauterie. On peut également faire en sorte de ne fixer que les parties "froides" du circuit qui serviront ainsi de support aux parties chauffées soumises à des contraintes de dilatation.

3.4 Vannes

La technologie des vannes en contact avec le sel à 700 °C est à définir car les vannes de type standard ne pourront convenir. Une technologie possible de vanne est une vanne Boisseau dont la partie en téflon ($T_{\text{fus}} = 327 \text{ °C}$) sera remplacée par de l'Hastelloy, du graphite ou du nitrure de Bore, l'étanchéité étant assurée par des joints en matériaux souples carbonés de type Papyex. La faisabilité d'une telle vanne pourrait être testée préalablement en présence de sel dans le four de M. Heusch au LPSC.

L'ORNL a utilisé des valves à bille en téflon pour les vannes qui n'étaient pas en contact direct avec le sel et a utilisé des "vannes à sel figé" quand il y avait contact. Le principe des "vannes à sel figé" consiste à figer le sel dans une section rétrécie du tuyau par refroidissement à l'aide d'un jet de gaz. On crée ainsi un bouchon de sel qui peut être refondu par chauffage résistif ou inductif. Le temps moyen de fusion du bouchon de sel par chauffage inductif est de 35 s à 12 kW et il est de 3 min à 1.6 kW par chauffage résistif [11].

La technologie de la vanne 3 de vidange d'urgence peut être différente des autres, du type "vanne que l'on casse" afin d'assurer une rapidité maximale d'exécution.

4. Système de fusion/alimentation des sels fluorés

4.1 Composition des sels

Voici quelques critères concernant le choix de la composition des sels :

- Absorption nucléaire faible : afin de favoriser la similitude avec les sels de nucléaire, on élimine les sels chlorés qui présentent une forte absorption nucléaire.
- On n'utilise pas BeF_2 à cause de la toxicité du béryllium.
- Point de fusion assez bas : les composés binaires (et plus) ont des points de fusion moins élevés que les simples fluorures, par exemple LiF fond à 847 °C contre 458 °C pour LiF- BeF_2),
- Thermodynamiquement stable vis-à-vis de la tuyauterie constituée de matériaux à base nickel (Ni/Cr/Mo/Fe). On admet généralement que le matériau des tuyaux est compatible avec les sels fondus si la différence de l'enthalpie libre standard de formation des fluorures entre les constituants du matériau et les sels est $> 20 \text{ kcal/mol-F}$ [4] (cf. Annexe 4).

Parmi plusieurs candidats possibles (cf. Annexe 3), le sel proposé pour la 1^{ère} étude est :

LiF-NaF-ZrF₄ (42-29-29 % mol).

4.2 Fusion des sels

4.2.1 Cuve conteneur

Le volume de sel à fondre est de 50 l contenu dans une cuve conteneur de diamètre $\varnothing = 40 \text{ cm}$ et de hauteur $H = 50 \text{ cm}$. Le réservoir de sel a une forme conique afin de faciliter le démoulage. On utilisera un réservoir par type de sel.

4.2.2 Puissance requise

On souhaite calculer la puissance P_{charge} à fournir pour permettre la fusion d'une charge de 140 kg de sel LiF-NaF-ZrF₄ (42-29-29 % mol).

Les constantes physiques de ce sel à 700 °C sont les suivantes [1]:

- masse volumique $\rho_{\text{sel}} = 2.8 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
- capacité calorifique $C_{\text{psel}} = 1.46 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- chaleur latente de fusion $\Delta H_{\text{sel}} = 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$ (pour LiF [12])

La quantité de chaleur à fournir au sel pour le porter de sa température initiale $T=20 \text{ °C}$ à sa température finale $T_f = 700 \text{ °C}$ est

$$Q = C_{\text{psel}} \Delta T + \Delta H_{\text{sel}}$$

AN : $Q = 2 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$, soit pour 140 kg une puissance $P_{\text{charge}} = 39 \text{ kW}$ pendant 2 heures.
ou bien $P_{\text{charge}} = 5 \text{ kW}$ pendant 15 heures.

4.2.3 Fours à résistance

Il existe de nombreux fabricants d'éléments chauffants utilisables pour fondre les 50 l de sel comme KANTHAL, KERFA, RESCAL. Des exemples de systèmes de chauffage adaptés à la fusion des sels contenus dans la cuve de dimension $\varnothing = 40 \text{ cm}$ et $H = 50 \text{ cm}$ de la boucle à sels sont présentés sur la figure 4 et dans le tableau :

Type	$\varnothing \text{ int (cm)}$	H (cm)	Puissance (kW)
Demi-coquilles FIBROTHAL (kanthal)	40	50	5
Semi-Monocoques de chauffage KERFA	40	50	5

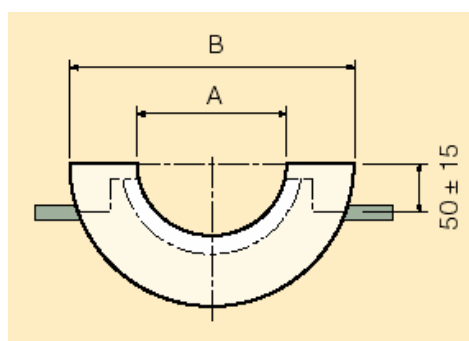


Figure 4 : Élément chauffant de type Demi-coquilles FIBROTHAL (kanthal)

4.3 Protocole expérimental de fusion/alimentation en sels

A partir du premier schéma de la boucle présenté sur la figure 2, on propose le protocole expérimental de fusion et d'alimentation de la boucle en sels suivant :

1) On remplit le conteneur de 140 kg de sels. Le sel se présente sous forme de lingots solides. L'installation utilisée par M. Heusch au LPSC peut fournir des lingots de dimensions maximales $\varnothing = 20 \text{ cm}$ et $H = 50 \text{ cm}$.

2) On met en route la pompe à vide (vanne 5 ouverte) et on fait le vide dans le circuit (vannes 1, 2, 3, 4, 10 ouvertes). On arrête de faire le vide (vanne 5 fermée) et on envoie de l'hélium dans le circuit (vannes 6, 7, 9 ouvertes), les sels fluorés fondus ne réagissant pas avec l'hélium [4]. On répète l'opération au moins 3 fois. Le gaz neutre utilisé ici est de l'hélium commercial préalablement filtré pour diminuer au maximum la teneur en O_2 et H_2O .

3) Le circuit étant rempli d'hélium, on met en route la fusion du sel sous un flux d'hélium (vannes 8, 9 ouvertes et 1 fermée) afin d'évacuer d'une part les dégazages et d'autre part de brasser et d'homogénéiser le sel liquide. Pendant la fusion, on pourrait également envisager de réduire les oxydes restants sous un balayage de H_2 .

4) Une fois le sel fondu, on met la pompe en route afin de remplir la boucle de sel ce qui constitue la phase critique du protocole (le risque de figeage du sel est important si tout le circuit n'est pas à une température au moins égale à $460^\circ C$ la température de solidification du sel). Il est également envisageable de créer une surpression d'hélium dans la cuve afin de faciliter le remplissage de la boucle en sel.

5) La vanne 2 de mise en charge du circuit est fermée tant que le niveau voulu dans la cuve à niveau constant n'est pas atteint. Une fois ce niveau atteint, on ouvre la vanne 2 et on ferme la vanne 1. Le débit de sel dans le circuit est alors assuré par le réglage du variateur de la pompe.

La vanne 3, qui en utilisation normale est toujours fermée, correspond à une vanne de vidange d'urgence du circuit en cas de problème.

5. Description de la pompe

5.1 Caractéristiques requises

La pompe doit pouvoir assurer deux fonctions :

- d'une part remplir le circuit en sel ce qui implique de pomper le sel du conteneur jusqu'à la cuve à niveau constant située à plus de 2 m du conteneur (la colonne de sel exerce alors une pression nommée charge hydrostatique).
- d'autre part assurer un débit constant dans le circuit et compenser les pertes de charges linéaires et singulières.

Charge hydrostatique

La pression qu'exerce la colonne de sel à pomper et à soulever est appelée charge hydrostatique C_H définie par:

$$C_H = H\rho g$$

Avec C_H = charge hydrostatique en Pa

H = hauteur en m

$\rho = 2.8 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ = masse volumique du sel

g = gravité

En estimant la différence de hauteur entre le conteneur et la cuve à niveau constant à environ 2.5 m, la charge hydrostatique (ou ici hauteur de pompage) est donc d'environ 7 mètres équivalent en colonne d'eau.

Perte de charge au niveau du circuit :

La perte de charge se décompose en une perte de charge linéaire et des pertes de charge singulières.

Le calcul de la perte de charge linéaire correspondant à l'écoulement dans une conduite rectiligne de longueur L, est donné par la formule générale suivante :

$$\Delta p = \frac{\rho V^2 \Lambda L}{2D}$$

Avec Δp = perte de charge linéaire en Pa

Λ = coefficient de perte de charge (donné par le diagramme de Moody [5] utilisant le nombre de Reynolds pour l'axe des X et le facteur de frottement $F = \Lambda/4$ pour l'axe des Y)

ρ = masse volumique du fluide en kg/m^3

V = vitesse d'écoulement en m/s

D = diamètre hydraulique du tube en m

L = longueur du tube en m

Les pertes de charges singulières, correspondant aux accidents de parcours dans les réseaux hydrauliques tels que les coudes, les changements de section, les vannes et les systèmes de mesure intrusifs, sont exprimées par la relation suivante :

$$\Delta p_s = K \frac{\rho V^2}{2}$$

Avec Δp_s = perte de charge singulière en Pa

K = coefficient de module de perte de charge dépendant de la nature de la résistance locale (disponible dans les formulaires [5])

A. N. : Les résultats des calculs approximatifs des pertes de charges pour le circuit simplifié de la figure 3 et pour deux valeurs de vitesse d'écoulement $V=1 \text{ m.s}^{-1}$ et $V=3 \text{ m.s}^{-1}$ d'un sel LiF-NaF-ZrF_4 , en ne tenant compte que des changements de section dans le calcul des pertes de charges singulières, sont présentés dans le tableau 1 suivant :

Données utilisées pour le calcul des pertes de charges à la Température $T=700 \text{ }^\circ\text{C}$:

- Masse volumique du sel : $\rho=2.8 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
- Viscosité cinématique du sel : $\nu=4.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
- Diamètre de tuyau : $D=5 \text{ cm}$
- Longueur totale de tuyaux : $L=13 \text{ m}$ ($2 \cdot 4.5 \text{ m}$ horizontal + $2 \cdot 2 \text{ m}$ vertical)
- Rugosité d'un tuyau : $e/D=0.004$
- Coefficient de module de charge pour un coude droit à 90° : $K=1.4$ [5]

Tableau 1 : pertes de charges dans la boucle pour deux valeurs de vitesse d'écoulement

	Λ	Δp linéaire en kPa	Δp_s singulière en kPa	Pertes de charges totales $\Delta p_T = (\Delta p + \Delta p_s)$ en kPa	Δp_T en mètres équivalent eau
$V=1 \text{ m.s}^{-1}$	0.020	7.3	7.8	15.1	1.4
$V=3 \text{ m.s}^{-1}$	0.016	52.4	70.6	122.9	12.6

D'après les calculs de pertes de charge, la pompe doit être capable de soulever une charge hydrostatique de 7 mètres équivalent en colonne d'eau et d'assurer un débit maximal $Q = 21 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ (pour $V=3 \text{ m.s}^{-1}$) en compensant une perte de charge de 12.6 mètres en équivalent eau. La hauteur manométrique totale de la pompe (aspiration + pertes dans les canalisations et accessoires) est donc d'environ 20 mètres équivalent eau.

Les calculs de pertes de charge précédents sont basés sur un circuit très simplifié qui ne tient pas compte des pertes singulières dues par exemple aux vannes et aux appareils de mesures (ces pertes peuvent être facilement doublées). Aussi une configuration de la pompe plus proche de la réalité pourrait être définie par les caractéristiques suivantes :

- un débit maximal $Q_{\max} = 21 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$
- une hauteur manométrique $H = 25 \text{ à } 30 \text{ m}$ équivalent eau maximum

5.2 Pompes commerciales

Quelles sont les pompes disponibles dans le commerce adaptées à un environnement de sels fondus à 700°C et possédant les caractéristiques requises énoncées au paragraphe 5.1? A priori, le verrou technique se situe au niveau de la température de fonctionnement des pompes.

Les 3 pompes commerciales suivantes méritent d'être investiguées plus en détail :

- Friatec type GVSN ($T_{\max} = 550^\circ\text{C}$) [13]
- Ensival/Moret type VE-VM (construction spéciale pour haute température) [14]
- SGL carbon (conception spéciale sur demande) [15]. Pour cette pompe dont un schéma est présenté en annexe 5, toutes les parties en contact avec les sels peuvent être fabriquées en métal "exotique" tel que l'Hastelloy ou l'Inconel. A partir des courbes caractéristiques des pompes $H=f(Q)$ données à 1500 tr/min par le constructeur et présentées en annexe 5, on trouve que la pompe de type 80.50.315 satisferait aux performances requises pour notre installation en termes de débit et de hauteur manométrique.

La possibilité d'utiliser une pompe électromagnétique pour la circulation des sels dans la boucle a été étudiée en Annexe 6. Cette analyse montre que l'usage d'une pompe électromagnétique est exclue car la tension à appliquer aux électrodes pour faire fonctionner la pompe est très supérieure à la tension correspondant à la décomposition des sels par électrolyse (l'enthalpie libre de formation du fluorure de zirconium étant de 1600 kJ, cela donne environ 4 V pour le décomposer; c'est une valeur minimale car le Zr(IV) en solution dans LiF aura une activité inférieure à l'unité [16]).

6. Définition des systèmes d'étude et des moyens de mesure

6.1 Systèmes d'étude

La boucle à sels est conçue de façon à pouvoir greffer sur le circuit entre les vannes 2 et 10 différents systèmes d'études, comme un échangeur thermique ou des systèmes d'étude sur le bullage et la corrosion.

L'introduction d'un échangeur thermique dans le circuit permet :

- la création d'un gradient de température $\Delta T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ qui permet d'avoir des conditions thermiques différentes lors de l'étude de la corrosion et du bullage,
- la possibilité de tester des échangeurs ou différentes configurations de plaques dans les échangeurs. Une modélisation 2D d'un échangeur thermique (échangeur de type SGL Carbon) a été réalisée par Roure [17] et a permis de décrire les pertes thermiques du dispositif et de donner une première approche du coefficient d'échange thermique entre le circuit primaire et secondaire de l'échangeur.

Concernant l'étude du bullage, il est à noter que cette étude requiert un volume supplémentaire qui est dans cette étude prévu à une quinzaine de litres maximum. Si ce volume n'est pas suffisant, il faut prévoir une cuve conteneur plus grande.

6.2 Moyens de mesure

Plusieurs instruments de mesures sont prévus dans la boucle afin de déterminer entre autre la température des sels, le débit de circulation du fluide, la composition des sels mais également pouvoir prélever/rajouter du sel ainsi que détecter des éventuelles fuites de sel.

Voici une liste non exhaustive des instruments de mesure envisagés :

- thermocouples : Ils sont de type K, reliés à une centrale d'acquisition Fluke.
- débitmètre : La technologie du débitmètre utilisée pour la mesure du débit du sel dans la boucle reste à déterminer. Les débitmètres électromagnétiques actuellement sur le marché fonctionnent à des températures inférieures à 200°C .
- sondes électrochimiques : Les sondes destinées à mesurer la composition chimique du sel ont un diamètre maximal de 7-8 cm et sont accessibles à partir de la boîte à gant. Elles sont immergées dans la cuve à niveau constant dotée d'un hublot afin de pouvoir observer la surface du sel (prévoir l'utilisation d'un miroir). Il est envisagé de brasser le sel dans la cuve d'une part pour homogénéiser le sel lors des mesures électrochimiques effectuées avec les sondes et d'autre part afin de comparer le fonctionnement des sondes en mode statique et dynamique. Une position appropriée des tuyaux d'entrée et de sortie du sel dans la cuve est suffisante pour créer un brassage significatif dans le bain.
- systèmes de prélèvements d'échantillons/d'ajout de sel. Ces systèmes sont situés dans la boîte à gants au dessus de la surface libre de la cuve à niveau constant. On rappelle que les fonctionnalités de la cuve à niveau constant sont l'analyse des sels par sondes électrochimiques, l'exécution de prélèvements d'échantillons et la mise à la nuance des sels (ajout possible de sel).
- système de détection de fuite. Il est intéressant d'étudier la faisabilité de détecter les éventuelles fuites de sel par une mesure résistive d'un fil entourant les tuyaux (dont la résistivité change de façon significative lorsque celui-ci est mouillé par le sel). Dans

tous les cas, la présence d'une cuve de rétention est souhaitable en dessous de la boucle.

- capteurs de pression d'hélium.

6.3 Boîte à gant

La boîte à gant est située au dessus de la cuve à niveau constant. A partir de la boîte, on a accès à la surface libre de cette cuve afin de pouvoir réaliser des analyses, des prélèvements et des ajouts de sels. Un système de climatisation est présent dans la boîte à gant.

7. Références

- [1] E. Merle-Lucotte, D. Heuer, C. Le Brun, J.M. Loiseaux, Etude des scénarios de déploiement mondial de l'électronucléaire, Note LPSC 04-68, Nov. 2004.
- [2] A. Nuttin, Potentialités du concept de réacteur à sels fondus pour une production durable d'énergie nucléaire basée sur le cycle thorium en spectre épithermique, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble 1, 2002.
- [3] S. David, A. Nuttin, Capacité des réacteurs à sels fondus pour l'incinération des déchets et la production d'énergie, rapport CNRS/PACE/DIR/2005.01, 2005.
- [4] C. Forsberg, Reactors with molten salts : options and missions, Frederic Joliot & Otto han Summer School on Nuclear Reactors, Cadarache, France, Aug. 25-Sept 2, 2004.
- [5] W. Huntley, M. Silverman, System design description of forced-convection molten-salt corrosion loops MSR-FCL-3 and MSR-FCL-4, ORNL/TM-5540, 1976.
- [6] J. Crowley, W. McDonald, D. Clark, Design and operation of forced-circulation corrosion testing loops with molten salt, ORNL/TM-528, 1963.
- [7] <http://www.haynesintl.com/guestbooknew.asp>
- [8] http://www.microtherm.uk.com/pdf/microtherm_product_data.pdf
- [9] <http://www.final.fr>
- [10] <http://www.kanthal.se>
- [11] M. Richardson, Development of freeze valve for use in the MSRE, ORNL/TM-128, 1962
- [12] O. Kubaschewski, E. Evans, La thermochimie en métallurgie, Gauthier-Villars éd., Paris, 1964.
- [13] <http://www.friatec.de>
- [14] <http://www.em-pumps.com>
- [15] <http://www.sgltechnic.fr>
- [16] J. C. Poignet, Communication personnelle, 2005.
- [17] A. Roure, Pré-dimensionnement d'une boucle de réacteur à sels fondus haute température, Stage MASTER PROFESSIONNEL Modélisation et Simulation des Systèmes Physiques Industriels, INPG, 2005.

Annexe 1: Dernière boucle réalisée à l'ORNL (1976) pour l'étude de corrosion [5]

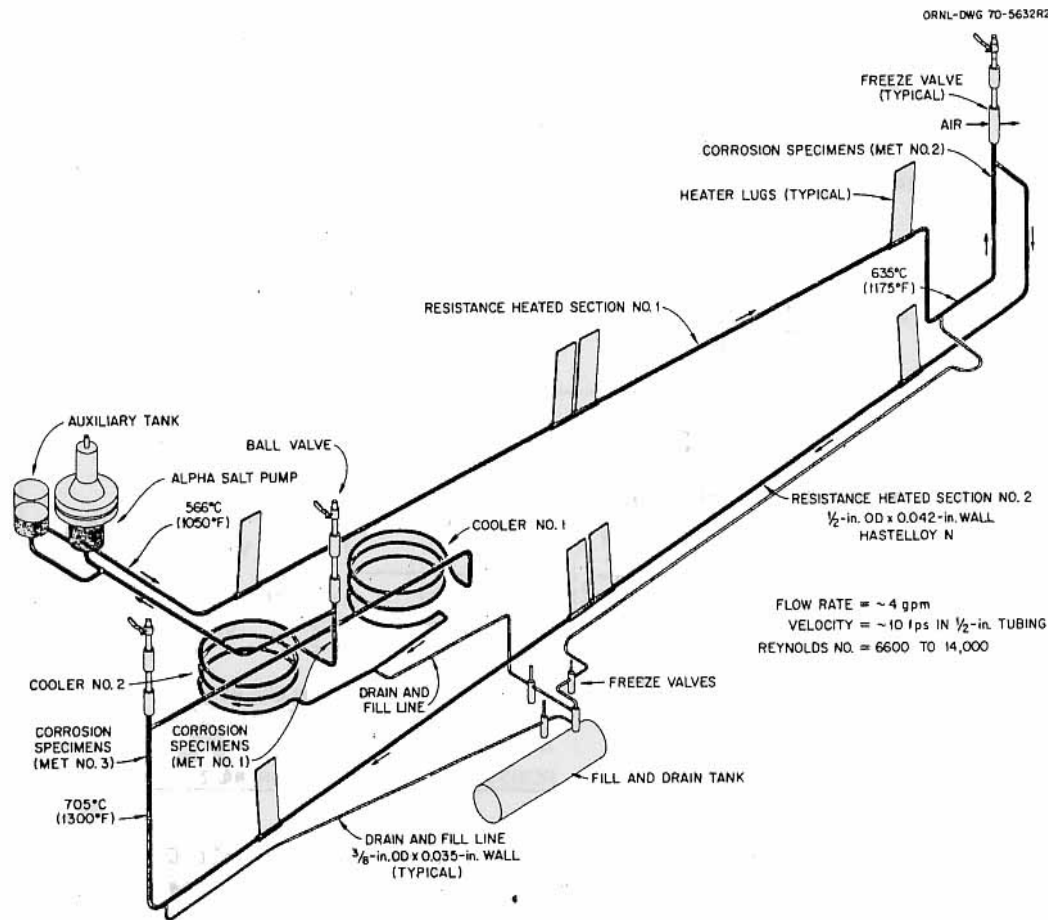


Fig. 1. Isometric drawing of Molten-Salt Forced Convection Corrosion Loop MSR-FCL-3 (1 in. = 25.4 mm; 1 gpm = 3.785 liters/min; 1 fps = 0.305 m/s).

Hastelloy N

$\varnothing = 13 \text{ mm}$, $L = 27\text{m}$

$570 < T < 700^{\circ}\text{C}$

$\text{LiF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$

Volume de 5 litres

$V = 3 \text{ m/s}$

$Q = 15 \text{ litres/min}$

- Matériaux à base Ni
- Vannes à " sel figé "
- Pompe ORNL

Annexe 2: Tuyauterie - Caractéristiques physiques des alliages possibles

NOMINAL CHEMICAL COMPOSITION, WEIGHT PERCENT							
Nickel*	Chromium	Molybdenum	Iron	Silicon	Manganese	Carbon	Others
71	7	16	5*	1*	0.80*	0.08*	Co=0.20* Cu=0.35* W=0.50* Al+Ti=0.35*
* Maximum = As balance							
AVERAGE PHYSICAL PROPERTIES							
Physical Property	Temp., °F	British Units		Temp., °C	Metric Units		
Density	72	0.320 lb./in. ³		22	8.86 g/cm ³		
Melting Range	2375-2550			1300-1400			
Electrical Resistivity	Room 1300 1500	47.5 microhm-in. 49.6 microhm-in. 48.8 microhm-in.		Room 705 815	1.20 microhm-m 1.26 microhm-m 1.24 microhm-m		
Mean Coefficient of Thermal Expansion	70-400	6.4 microinches/in.-°F		21-204	11.6 x 10 ⁻⁶ m/m-K		
	70-600	6.7 microinches/in.-°F		21-316	12.3 x 10 ⁻⁶ m/m-K		
	70-800	7.0 microinches/in.-°F		21-427	12.7 x 10 ⁻⁶ m/m-K		
	70-1000	7.4 microinches/in.-°F		21-538	13.4 x 10 ⁻⁶ m/m-K		
	70-1200	7.8 microinches/in.-°F		21-649	14.0 x 10 ⁻⁶ m/m-K		
	70-1400	8.1 microinches/in.-°F		21-760	14.7 x 10 ⁻⁶ m/m-K		
	70-1600	8.5 microinches/in.-°F		21-871	15.3 x 10 ⁻⁶ m/m-K		
	70-1800	8.8 microinches/in.-°F		21-982	15.8 x 10 ⁻⁶ m/m-K		
Thermal Conductivity	212	79 Btu-in./ft. ² -hr.-°F		100	11.5 W/m-K		
	392	88 Btu-in./ft. ² -hr.-°F		200	13.1 W/m-K		
	572	99 Btu-in./ft. ² -hr.-°F		300	14.4 W/m-K		
	752	109 Btu-in./ft. ² -hr.-°F		400	16.5 W/m-K		
	932	124 Btu-in./ft. ² -hr.-°F		500	18.0 W/m-K		
	1112	140 Btu-in./ft. ² -hr.-°F		600	20.3 W/m-K		
	1292	162 Btu-in./ft. ² -hr.-°F		700	23.6 W/m-K		
Specific Heat	212	0.100 Btu/lb.-°F		100	419 J/Kg-K		
	392	0.105 Btu/lb.-°F		200	440 J/Kg-K		
	572	0.109 Btu/lb.-°F		300	456 J/Kg-K		
	752	0.112 Btu/lb.-°F		400	469 J/Kg-K		
	896	0.114 Btu/lb.-°F		480	477 J/Kg-K		
	1004	0.116 Btu/lb.-°F		540	485 J/Kg-K		
	1058	0.125 Btu/lb.-°F		570	523 J/Kg-K		
	1094	0.135 Btu/lb.-°F		590	565 J/Kg-K		
	1148	0.140 Btu/lb.-°F		620	586 J/Kg-K		
	1220	0.139 Btu/lb.-°F		660	582 J/Kg-K		
	1256	0.138 Btu/lb.-°F		680	578 J/Kg-K		
	1292	0.138 Btu/lb.-°F		700	578 J/Kg-K		

Caractéristiques physiques de l'Hastelloy N.

Nominal Chemical Composition, Weight Percent

Ni	Co	Fe	Cr	Mo	Cb+Ta	Mn	Si	Al	Ti	C
62 ^a	1 [*]	5 [*]	21	9	3.7	0.5 [*]	0.5 [*]	0.4 [*]	0.4 [*]	0.10 [*]

^aAs Balance

^{*} Maximum

TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES

	Temperature, °F	British Units	Temperature, °C	Metric Units
Density	Room	0.305 lb/in ³	Room	8.44 g/cm ³
Melting Range	2350-2460		1290-1350	
Electrical	Room	50.8 microhm-in.	Room	129 microhm-cm
Resistivity	200	52.0 microhm-in.	100	132 microhm-cm
	400	52.8 microhm-in.	200	134 microhm-cm
	600	53.1 microhm-in.	300	135 microhm-cm
	800	53.5 microhm-in.	400	136 microhm-cm
	1000	54.3 microhm-in.	500	137 microhm-cm
	1200	54.3 microhm-in.	600	138 microhm-cm
	1400	53.9 microhm-in.	700	138 microhm-cm
	1600	53.5 microhm-in.	800	137 microhm-cm
	1800	53.1 microhm-in.	900	136 microhm-cm
			1000	135 microhm-cm
Thermal	Room	68 Btu-in./ft. ² hr.-°F	Room	9.8 W/m-K
Conductivity	200	75 Btu-in./ft. ² hr.-°F	100	10.9 W/m-K
	400	87 Btu-in./ft. ² hr.-°F	200	12.5 W/m-K
	600	98 Btu-in./ft. ² hr.-°F	300	13.9 W/m-K
	800	109 Btu-in./ft. ² hr.-°F	400	15.3 W/m-K
	1000	121 Btu-in./ft. ² hr.-°F	500	16.9 W/m-K
	1200	132 Btu-in./ft. ² hr.-°F	600	18.3 W/m-K
	1400	144 Btu-in./ft. ² hr.-°F	700	19.8 W/m-K
	1600	158 Btu-in./ft. ² hr.-°F	800	21.5 W/m-K
	1800	175 Btu-in./ft. ² hr.-°F	900	23.4 W/m-K
			1000	25.6 W/m-K
Specific Heat	Room	0.098 Btu/lb.-°F	Room	410 J/Kg-K
	200	0.102 Btu/lb.-°F	100	428 J/Kg-K
	400	0.109 Btu/lb.-°F	200	455 J/Kg-K
	600	0.115 Btu/lb.-°F	300	477 J/Kg-K
	800	0.122 Btu/lb.-°F	400	503 J/Kg-K
	1000	0.128 Btu/lb.-°F	500	527 J/Kg-K
	1200	0.135 Btu/lb.-°F	600	552 J/Kg-K
	1400	0.141 Btu/lb.-°F	700	576 J/Kg-K
	1600	0.148 Btu/lb.-°F	800	600 J/Kg-K
	1800	0.154 Btu/lb.-°F	900	625 J/Kg-K
			1000	648 J/Kg-K
Mean Coefficient	70-200	7.1 microinches/in.-°F	25-100	12.8 10 ⁻⁶ μ/m-°C
of Thermal	70-400	7.3 microinches/in.-°F	25-200	13.1 10 ⁻⁶ μ/m-°C
	70-600	7.5 microinches/in.-°F	25-300	13.4 10 ⁻⁶ μ/m-°C
	70-800	7.7 microinches/in.-°F	25-400	13.8 10 ⁻⁶ μ/m-°C
	70-1000	8.0 microinches/in.-°F	25-500	14.2 10 ⁻⁶ μ/m-°C
	70-1200	8.4 microinches/in.-°F	25-600	14.8 10 ⁻⁶ μ/m-°C
	70-1400	8.7 microinches/in.-°F	25-700	15.4 10 ⁻⁶ μ/m-°C
	70-1600	9.2 microinches/in.-°F	25-800	16.0 10 ⁻⁶ μ/m-°C
	70-1800	9.6 microinches/in.-°F	25-900	16.7 10 ⁻⁶ μ/m-°C
			25-1000	17.4 10 ⁻⁶ μ/m-°C

Caractéristiques physiques de l'Inconel (Ni62/Cr21/Mo9/Fe5).

Annexe 3: Caractéristiques physiques des sels fluorés

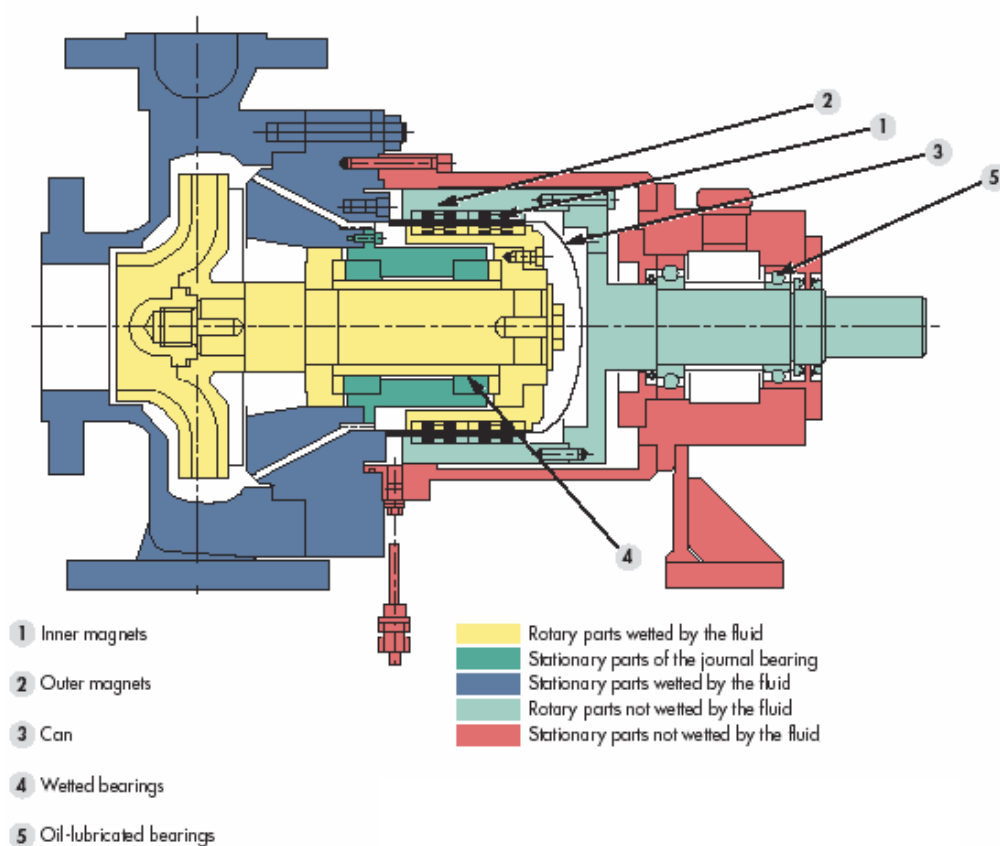
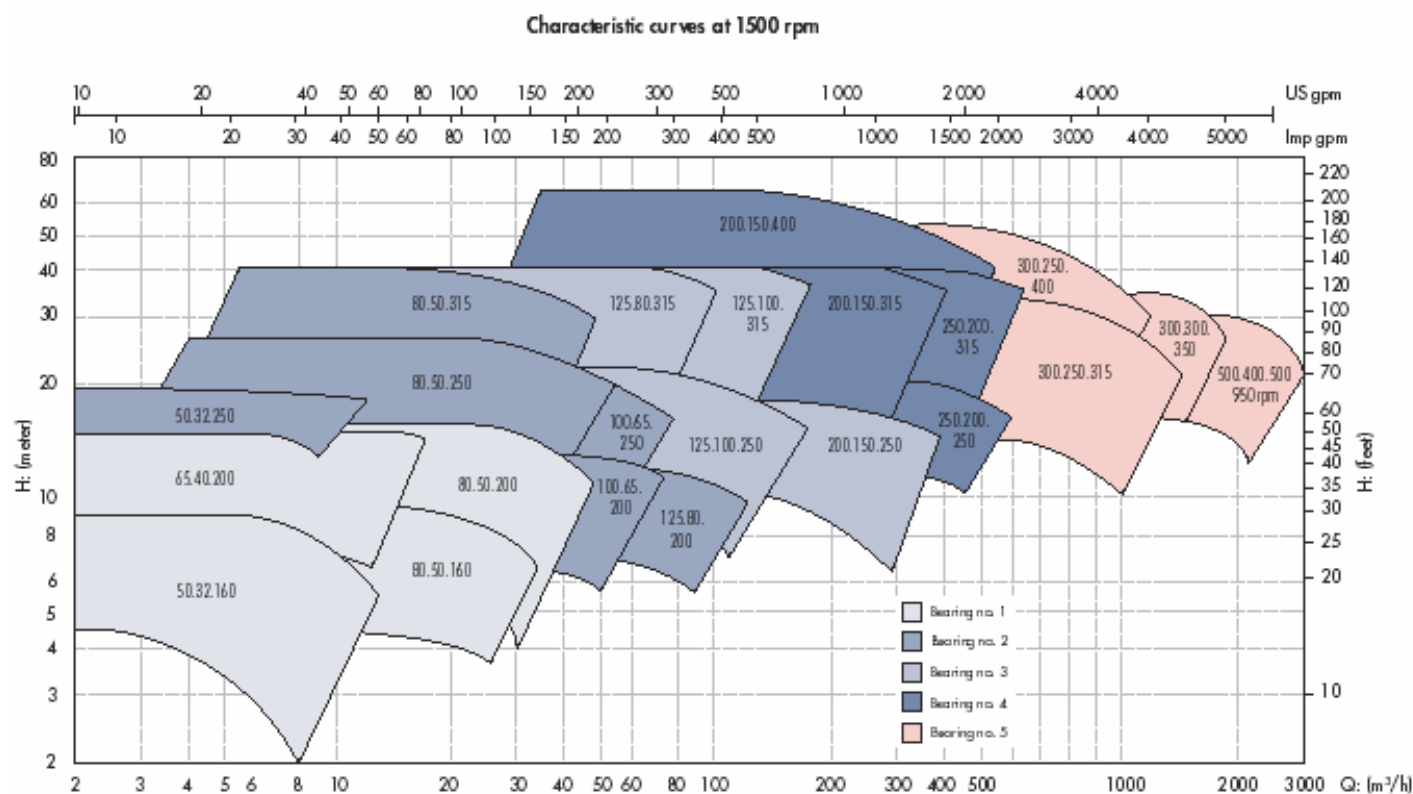
Salt (mol %)	Form. wt. (g/mol)	Melt. pt. (°C)	Density (g/cc), T(°C)	700°C Heat capacity (cal/g-°C)	Viscosity (cP), T(K)	Thermal cond. (Watts/ cm-°C)
Alkali-Fluorides (IA) : Nontoxic						
LiF-NaF-KF (11.5-46.5-42)	41.2	454	2.53-7.3E-4*T	0.45	0.04exp(4170/T)	0.006-0.01
LiF-RbF (43-57)	70.7	475	3.30-6.9E-4*T	0.284 (est)	0.021exp(4678/T)	~ 0.06
Alkali + Alkaline Earth Fluorides (IA + IIA)						
LiF-BcF ₂ (66-34)	33.1	458	2.28-4.884E-4*T	0.57	0.116exp(3755/T)	0.011
NaF-BcF ₂ (57-43)	44.1	360	2.27-3.7E-4*T	0.52	0.034exp(5164/T)	~ 0.01
Alkali + ZrF₄: Nontoxic and Low Tritium Yield						
NaF-ZrF ₄ (50-50)	104.6	510	3.79-9.3E-4*T	0.28	0.071exp(4168/T)	~0.01 (est)
NaF-KF-ZrF ₄ (10-48-42)	102.3	385	3.45-8.9E-4*T (est.)	0.26 (est.)	0.061exp(3171/T) (est.)	~0.01
Li-NaF-ZrF ₄ (42-29-29)	71.56	460	3.37-8.3E-4*T	0.35	0.0585exp(4647/T)	~0.01
Fluoroborates: Secondary Salt Candidates						
NaF-NaBF ₄ (8-92)	104.4	385	2.252-7.11E-4*T	0.36	0.0877exp(2240/T)	~0.005
KF- KBF ₄ (25-75)	120.48	460	2.258-8.02E-4*T (est.)	> 0.32	Similar to KBF ₄	~0.005
RbF - RbBF ₄ (31-69)	151.25	442	2.494-8.7E-4*T (est.)	?	?	?
NaBF ₄	109.8	408	2.263-7.51E-4*T	0.36	0.0832exp(2360/T) 0.0787exp(2406/T)	~0.005
KBF ₄	125.9	570	2.228-8.15E-4*T	0.32	0.0946exp(2280/T)	~0.005
RbF ₄	172.27	582	2.795-10.4E-4*T	?	?	~0.005

^aOther mixtures of interest: NaF-RbF-ZrF₄ (8-50-42, mp = 400°C) and LiF-NaF-RbF (45-10-45, mp = 430°C), References: ORNL/TM-2316, ORNL/TM-4308, ORNL-4229; ORNL-4344, ORNL-4449, ORNL-4586, ORNL-4622, ORNL-4676; *Fluid Fueled Reactors* (1958); *Progress in Nuclear Energy* Series 4, Vol. 2, p. 140 (1960), *Nucl. Appl. Technol.* 8 (1970); *Nucl. Sci. Eng.* Vol. 71 p.200 (1963); R. DeWitt in *Phys and Chem.Liq.* Vol. 4 (no.2-3), pp.113-123 (1974).

Annexe 4: Stabilité thermodynamique des constituants des sels fluorés et du matériau de tuyauterie.

Constituent	Free energy of formation at 1000°K (kcal/mol-F)	Cation thermal capture cross section (barns)
Majority Constituents (>99.9 mol %)		
⁷ LiF	-125	0.033 (⁷ Li)
MgF ₂	-113	0.063
NaF	-112	0.52
RbF	-112	0.70
KF	-109	2.1
BeF ₂	-104	0.01
ZrF ₄	-94	0.18
¹¹ BF ₃	~-95	0.05 (¹¹ B)
AlF ₃	-90	0.23
SiF ₄	~XX	0.16
F	N	0.01
Structural Metal Constituents (Trace)		
CrF ₂	-75.2	3.0
FeF ₂	-66.5	2.5
NiF ₂	-55.3	4.5
MoF ₆	-50.9	2.5

Annexe 5: Pompes chimiques en métaux "exotiques" - SGL Carbon



Annexe 6: Dimensionnement d'une pompe électromagnétique pour le circuit de sel

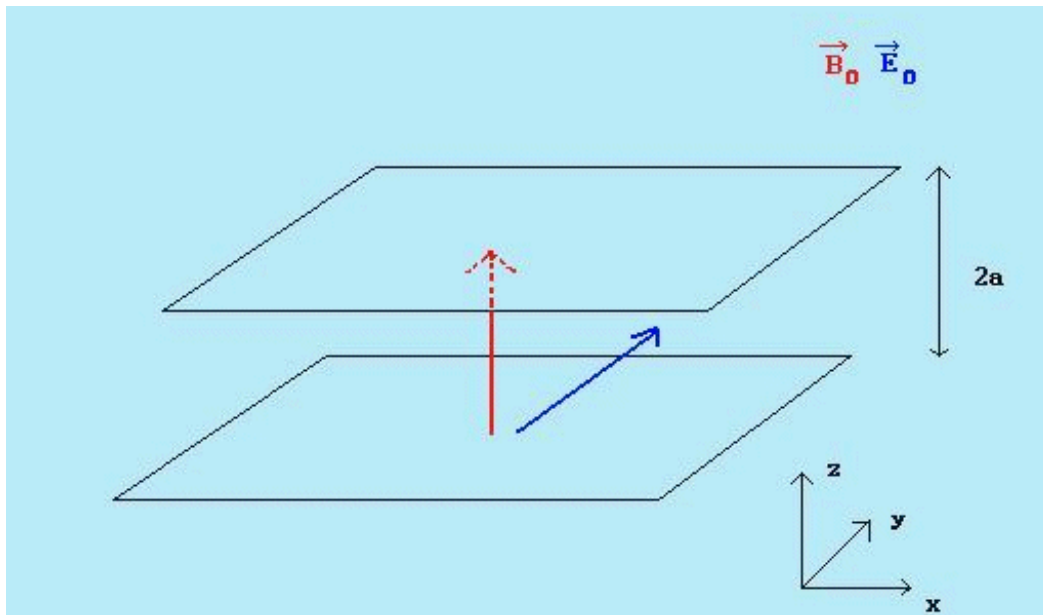


Figure A1 : schéma de principe d'une pompe MHD par conduction

Valeurs caractéristiques :

Débit : $Q = 2 \text{ l.s}^{-1} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Distance de l'entrefer : $2a = 20 \text{ cm}$

Distance inter-électrodes : $2h = 40 \text{ cm}$

Longueur de la pompe : $L = 50 \text{ cm}$

Intensité du champ magnétique = $B_0 = 1 \text{ T}$

Propriétés physiques du sel :

- masse volumique : $\rho = 3 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
- viscosité cinématique : $\nu = 4,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- conductivité électrique : $\sigma = 300 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$

Nombre de Hartman : $Ha = B_0 a \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \nu}} = 15,25$

Puissance de la pompe : $\Delta P = 12 \cdot 10^4 \text{ Pascals}$

La loi d'OHM donne :

$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

avec $\mathbf{E} = (0, E_0, 0)$ et $\mathbf{B} = (0, 0, B_0)$ (ici on fait l'hypothèse : on ignore les effets de bouts $L \gg (\max(a, h))^1$).

¹ On note que la continuité des courants est respectée lorsqu'on fait l'hypothèse $\mathbf{v} = (v_x(z), 0, 0)$

Le courant moyen dans le sel est trouvé par intégration de la loi d'OHM suivant z

$$\bar{J} = \frac{1}{4ah} \int_{-a}^{+a} J_y(z) dz$$

$$\bar{J} = \sigma \bar{V} B_o (K - 1) \text{ avec } K = E_o / B_o \bar{V}$$

où \bar{V} est la Vitesse moyenne dans la conduite avec $\bar{V} = \frac{1}{4ah} \int_{-a}^{+a} V_x(z) dz$

Pour que le système décrit ci-dessus fonctionne en mode pompe il faut :

$$K > 1 \text{ ou bien } E_o > B_o \bar{V}$$

Application numérique :

$$\bar{V} = Q / 4ha = 2.10^{-3} / (4 * 0,1 * 0,2) = 0,025 \text{ m.s}^{-1}$$

c'est à dire $E_o > 0,025 \text{ V.m}^{-1}$

Profil des vitesses dans la conduite (Hypothèse $h/a \gg 1$) :

$$V_x(z) = \left(\frac{E_o}{B_o} - \frac{1}{\sigma B_o^2} \frac{dp}{dx} \right) \left(1 - \frac{\text{ch}\left(Ha \cdot \frac{z}{a}\right)}{\text{ch}Ha} \right)$$

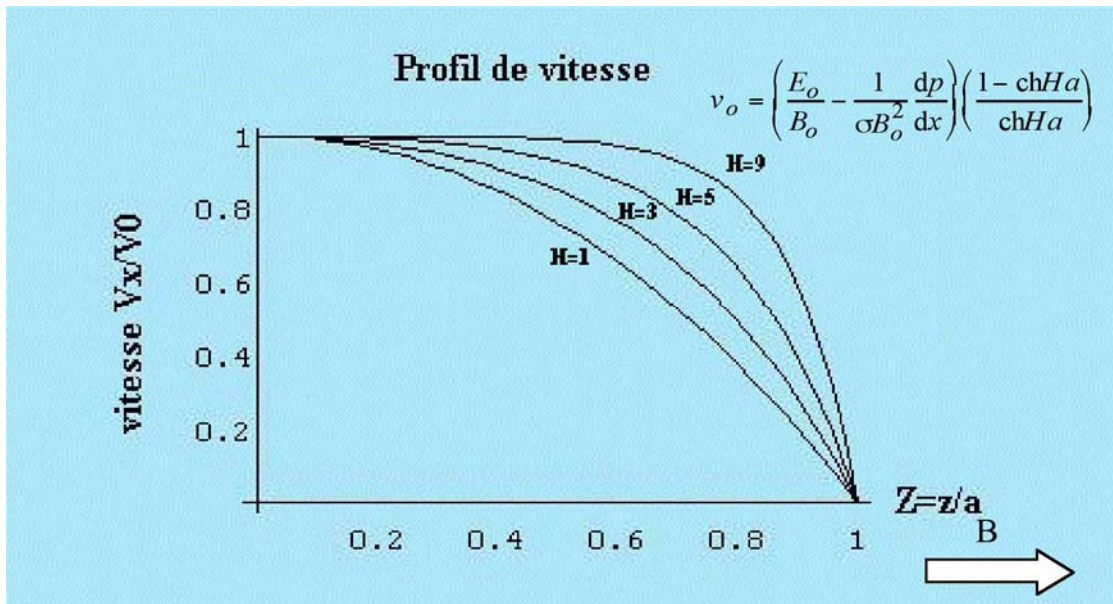


Figure A2 : profil des vitesses dans la conduite MHD pour différents nombres de Hartman

Vitesse moyenne dans la conduite :

$$\begin{aligned}
 \bar{V} &= \frac{1}{4a} \int_{-a}^{+a} V_x(z) dz \\
 \bar{V} &= \frac{1}{4a} \left(\frac{E_o}{B_o} - \frac{1}{\sigma B_o^2} \frac{dp}{dx} \right) \int_{-a}^{+a} \left(1 - \frac{\text{ch}\left(Ha \cdot \frac{z}{a}\right)}{\text{ch}Ha} \right) dz \\
 &= \frac{1}{4a} \cdot \left(\frac{E_o}{B_o} - \frac{1}{\sigma B_o^2} \frac{dp}{dx} \right) \cdot 2a \cdot \left(1 - \frac{\text{sh}Ha}{Ha \cdot \text{ch}Ha} \right) \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{E_o}{B_o} - \frac{1}{\sigma B_o^2} \frac{dp}{dx} \right) \cdot \left(1 - \frac{\text{th}Ha}{Ha} \right)
 \end{aligned}$$

Débit moyen dans la conduite

$$Q = 4ah \cdot \bar{V} = 2ah \cdot \left(\frac{E_o}{B_o} - \frac{1}{\sigma B_o^2} \frac{dp}{dx} \right) \cdot \left(1 - \frac{\text{th}Ha}{Ha} \right)$$

On peut donc obtenir le E_o correspondant

$$E_o = \frac{Ha \cdot Q \cdot B_o}{2ah \cdot (Ha - \text{th}Ha)} + \frac{1}{\sigma B_o} \frac{dp}{dx}$$

avec $\frac{dp}{dx} = \frac{\Delta P}{L}$ la différence de pression à compenser sur la longueur L de la pompe.

Application numérique :

Pour abaisser cette tension, il ne sert à rien de jouer sur la dimension de la section transverse de la pompe pour diminuer le frottement d'origine MHD car ce terme est négligeable face au second qui correspond à la perte de charge dans le circuit.

$$E_o = \frac{15 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot B_o}{2 \cdot 0,1 \cdot 0,2 \cdot 14} + \frac{1}{300 \cdot B_o} \frac{12 \cdot 10^4}{0,5}$$

$$E_o = 0,535 B_o + \frac{800}{B_o}$$

$$\text{pour } B_o = 1 \text{ T } E_o = \frac{15}{2 \cdot 14} + 8 \cdot 10^2 = 800 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$$

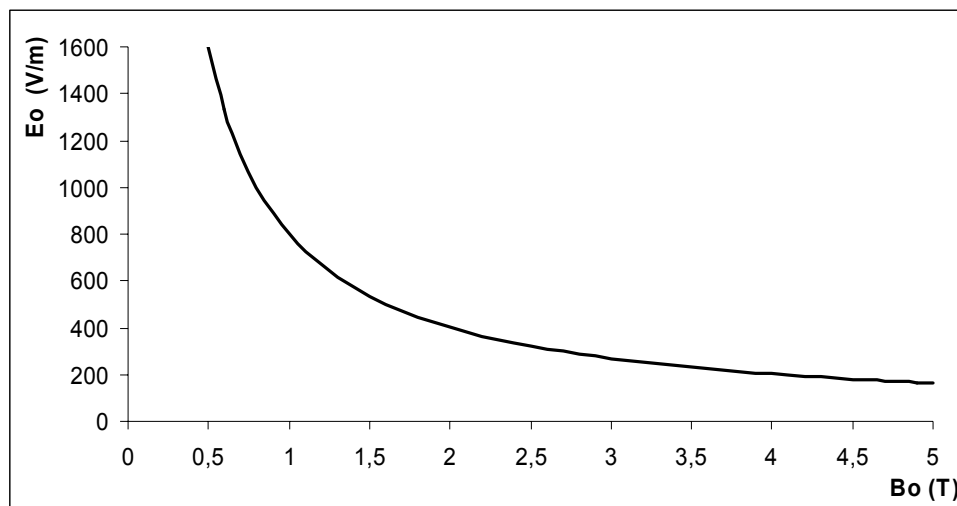


Figure A3 : Evolution de la ddp à appliquer aux électrodes en fonction du champ magnétique pour une pompe devant relever la pression d'un liquide de conductivité électrique $\sigma = 300 (\Omega.m)^{-1}$ de $\Delta P = 12.10^4$ Pa sur une longueur $L = 50$ cm.

Annexe 7 : Principales caractéristiques de la boucle (matériaux, volumes, vitesses, température, etc.)

Matériau des tuyaux et des cuves	Inconel
Dimensions des tuyaux	$\varnothing = 5 \text{ cm}$, $L = 13 \text{ m}$, $V=25,5 \text{ l}$
Dimensions de la cuve conteneur	$\varnothing = 40 \text{ cm}$, $H = 50 \text{ cm}$, $V=63 \text{ l}$
Dimensions de la cuve à niveau constant	$\varnothing = 30 \text{ cm}$, $H = 30 \text{ cm}$, $V=21 \text{ l}$
Température de fonctionnement (tuyaux et sel)	700 °C
Vitesse d'écoulement	1 à 3 m.s ⁻¹
Débit maximal	21 m ³ .h ⁻¹
Pertes de charges totales (pour $Q=21 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ en mode recirculant))	250 kPa
Composition du sel	LiF-NaF-ZrF ₄ (42-29-29 % mol)
Grandeurs physiques du sel	
- masse volumique	2.8 10 ³ kg.m ⁻³
- capacité calorifique	1.46 10 ³ J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
- chaleur latente de fusion	10 ⁶ J.kg ⁻¹ (pour LiF [12])
- viscosité cinématique du sel	4.5.10 ⁻⁶ m ² .s ⁻¹